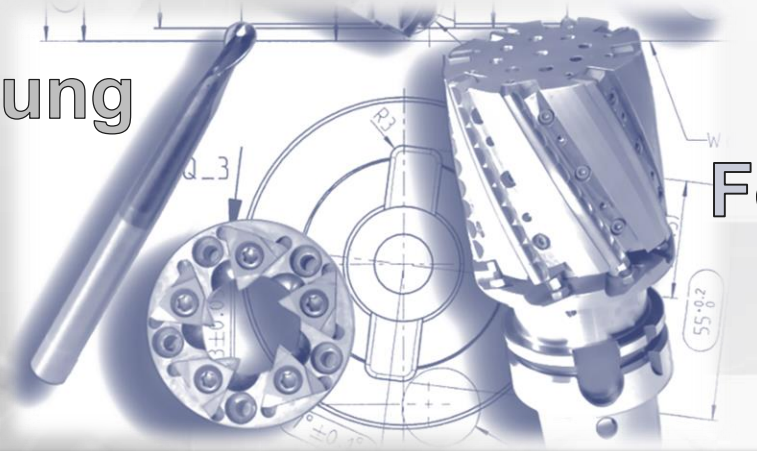
GFE – Gesellschaft für
Fertigungstechnik und Entwicklung
Schmalkalden e.V.

Mitglied der
ZUSE-GEMEINSCHAFT
FORSCHUNG, DIE ANKOMMT.

Entwicklung



Forschung

Dienstleistung

Hartzerspanung als Alternative zum Schleifen schwer bearbeitbarer Werkstoffe

Agenda

1 Vorstellung der GFE

2 Hartbearbeitung

3 Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

4 Analyse verschiedener Lösungsansätze

5 Einsatzbeispiele

6 Zusammenfassung und Ausblick

Agenda

1 Vorstellung der GFE

2 Hartbearbeitung

3 Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

4 Analyse verschiedener Lösungsansätze

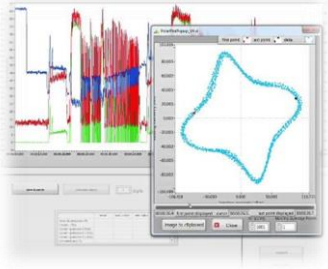
5 Einsatzbeispiele

6 Zusammenfassung und Ausblick

Vorstellung der GFE

Die GFE – Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V. :

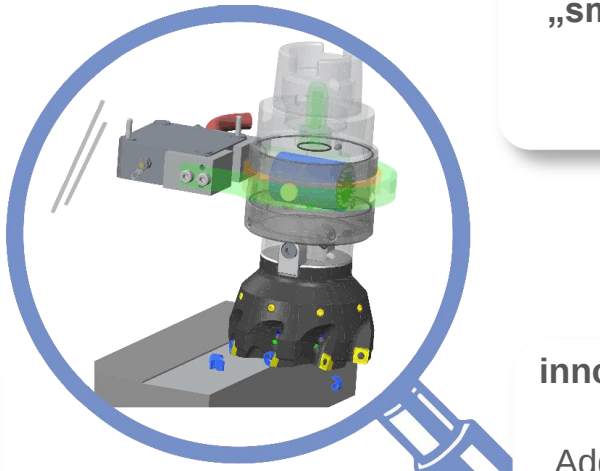
Forschung und Dienstleistung rund um die Zerspanung



Prozesskettengestaltung & Qualitätssicherung

komplexe Charakterisierung von Werkzeugen, Bauteilen und Prozessen

Werkzeugentwicklung & virtuelle Prozessgestaltung



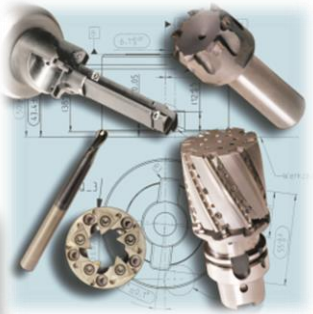
PVD-Hartstoffschichten & Schneidenmikrogeometrie

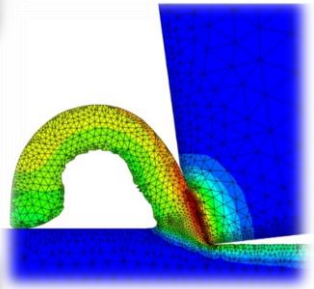
„smarte“ Werkzeuge Prozesse

Sensor + Aktor

innovative Fertigungs-technologien

Add. Fertigung, Laser, …

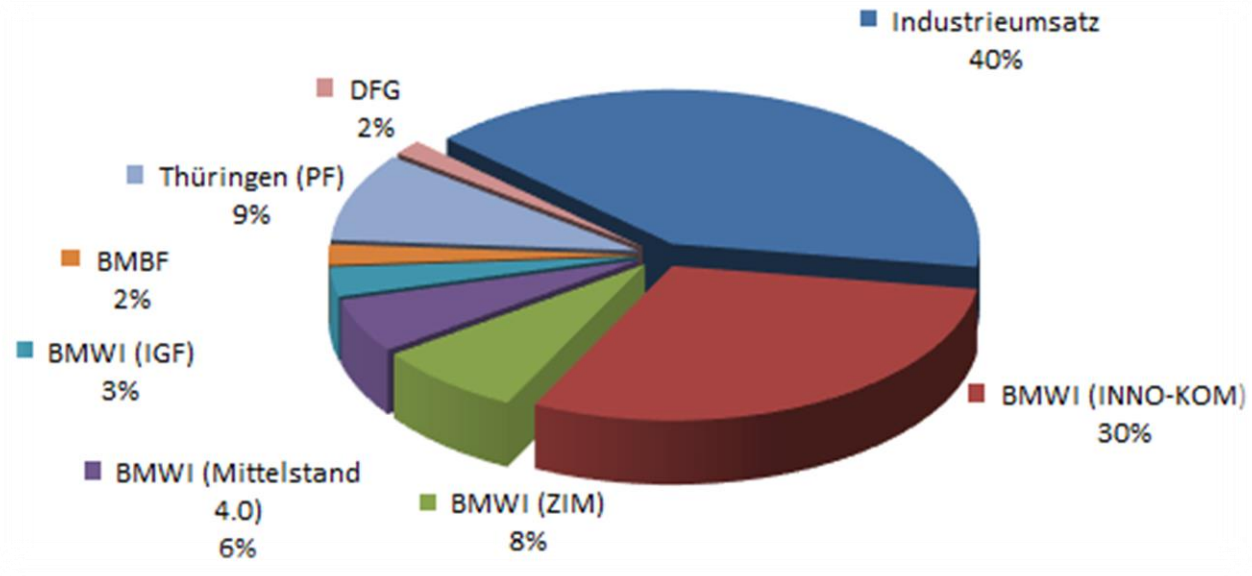




Vorstellung der GFE

Kennzahlen der GFE (Stand 2021)

gegründet:	17. Juni 1992 als gemeinnützige Forschungseinrichtung (nicht grundfinanziert)
heute:	123 Mitglieder (davon ca. 69 produzierende Unternehmen)
F&E Projekte:	29 (im Jahresdurchschnitt)
Mitarbeiter/-innen:	67 (im Jahresdurchschnitt)
Umsatz:	5.376 TEUR



u.a.

<u>Tochterunternehmen: GFE - Präzisionstechnik Schmalkalden GmbH</u>

Mitarbeiter/-innen: 12

Agenda

1 Vorstellung der GFE

2 Hartbearbeitung

3 Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

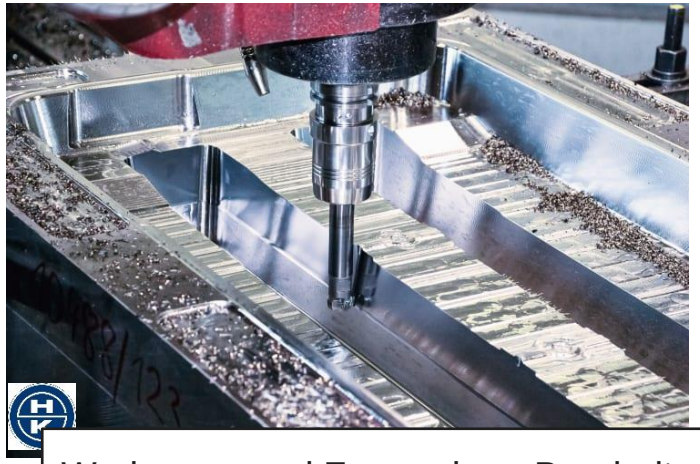
4 Analyse verschiedener Lösungsansätze

5 Einsatzbeispiele

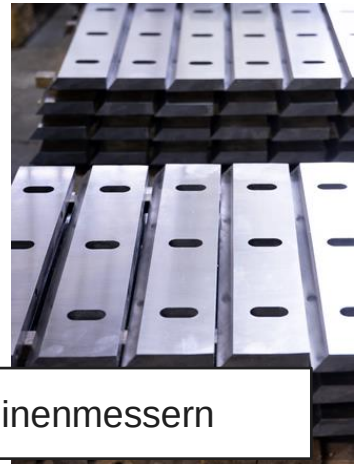
6 Zusammenfassung und Ausblick

Hartbearbeitung

Anwendungsbeispiele

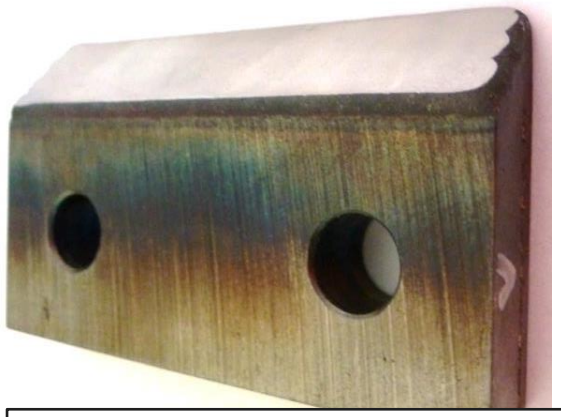


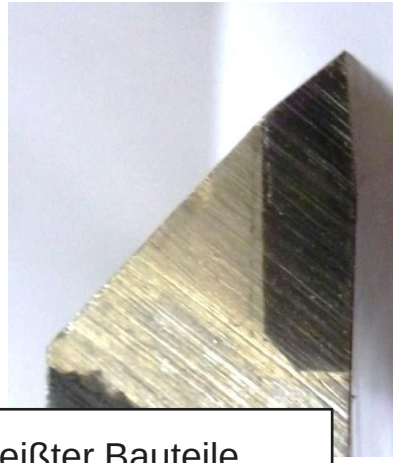
Werkzeug- und Formenbau: Bearbeitung von 1.2379



Spanende Bearbeitung von Maschinenmessern

Medizintechnik: Bearbeitung von CoCr-Legierungen





Finishbearbeitung auftraggeschweißter Bauteile

Herausforderungen bei der Hartbearbeitung

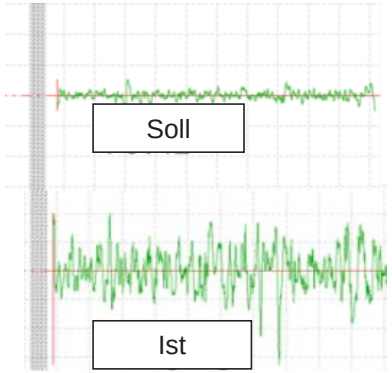
- Hohe Härte und Festigkeit der bearbeiteten Werkstücke:
- Geringe Prozesssicherheit und ungleichmäßige Oberflächenqualität
- Bearbeitung von Hart-Weich Übergängen
- hohe Werkzeuganforderungen (hohe Zerspankräfte und Zerspantemperaturen)

Werkzeug-Verschleiß (Ausbrüche)

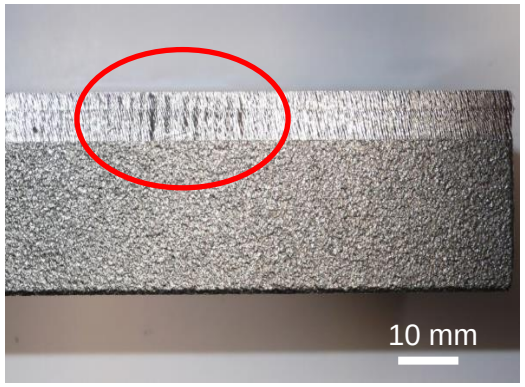
Schleifbrand und Rissbildung

Schleiffehler in der Werkzeugoberfläche

Optische Fehler in der Bauteiloberfläche



Ungenügende Rauheit



Rattermarken in der Werkstückoberfläche

Hartbearbeitung

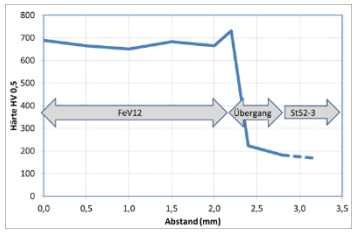
Vergleich verschiedener Bearbeitungsmöglichkeiten

Kenngröße	Spanen	Schleifen /Erodieren
Fertigungszeit	Gering	Hoch
Zeitspanvolumen	Hoch	Gering
Oberflächenqualität / Genauigkeit	Gering	Hoch
Prozesssicherheit	Gering	Hoch
Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften	gering	möglich
Wirtschaftlichkeit	Hoch	Gering

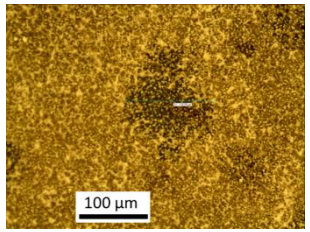
→ Verbesserte Wirtschaftlichkeit der Endbearbeitung gehärteter Oberflächen mittels Zerspanung

→ Neue Werkzeuge und Technologien zur Finishbearbeitung notwendig

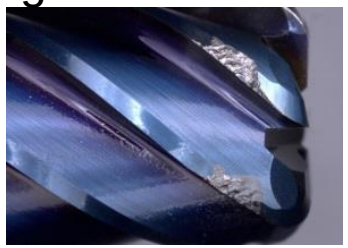
Besondere Herausforderungen



Bearbeitung Zonenübergänge



Werkstoff mit hoher Verschleißbeständigkeit



Hoher Werkzeugverschleiß

Agenda

1 Vorstellung der GFE

2 Hartbearbeitung

3 Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

4 Analyse verschiedener Lösungsansätze

5 Einsatzbeispiele

6 Zusammenfassung und Ausblick

Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

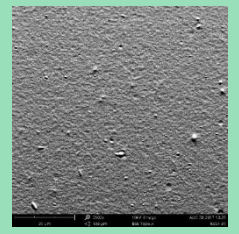
Einflussfaktoren auf das Einsatzverhalten / Verschleißverhalten

Geometrie

- Makrogeometrie
- Mikrogeometrie
- Spanraumgestaltung
- Genauigkeit
- Vorbehandlung
- …

Grundwerkstoff

- Werkstoffauswahl
- Eigenschaften (Festigkeit, Temperaturbeständigkeit)
- Zusammensetzung und Gefüge
- …



- Schichtsystem und -eigenschaften
- Rauheit
- Herstellverfahren
- Reproduzierbarkeit
- …

Beschichtung / Oberfläche

- Prozess / Prozessparameter
- Standzeit
- Bauteilqualität
- Temperatur
- Kühlschmiermittel
- Wirtschaftlichkeit
- …

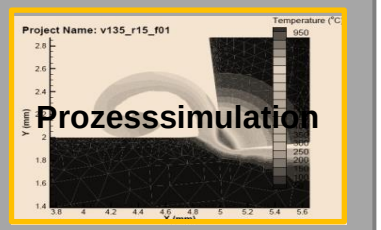
Anwendung

Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

Vorgehensweise zur Entwicklung neuer Werkzeuge und Technologien für die Hartbearbeitung

Referenzversuche

- Werkstoff- & Werkzeuganalysen
- Bearbeitungstechnologie
- Analyse Zerspanprozess



Prozesssimulation

- Prozesstemperatur
- Werkzeugbelastung
- Spanbildung

Makrogeometrie

- Schneidstoff
- Geometrie
- Fertigung

Mikrogeometrie

- Kantenpräparation
- Haftungsoptimierung
- Schichtnachbehandlung

Beschichtung

- Schicht-zusammensetzung
- Schichtstruktur
- Verschleißverhalten

Einsatztests

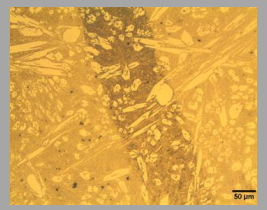
- Standzeitverhalten
- Bauteileigenschaften

Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

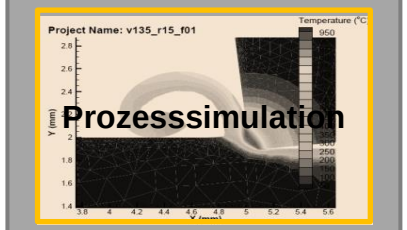
Vorgehensweise zur Entwicklung neuer Werkzeuge und Technologien für die Hartbearbeitung

Referenzversuche

Werkstoffanalysen



Analyse Zerspanung

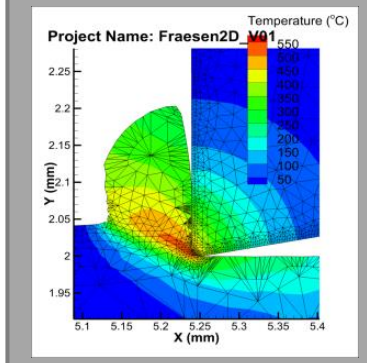


Prozesssimulation

Kräfte; Temperaturen

Mechanische Spannungen

Verformungen

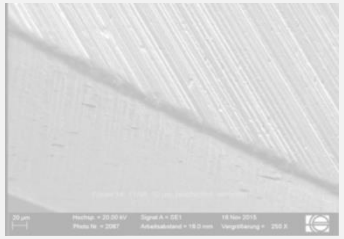


Makrogeometrie-entwicklung

Makrogeometrie

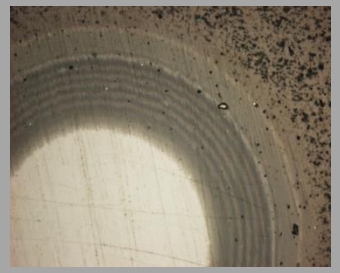
Mikrogeometrie

Kantenpräparation



Beschichtung

Schicht-zusammensetzung



Einsatztests

Standzeitverhalten

Agenda

1 Vorstellung der GFE

2 Hartbearbeitung

3 Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

4 Analyse verschiedener Lösungsansätze

5 Einsatzbeispiele

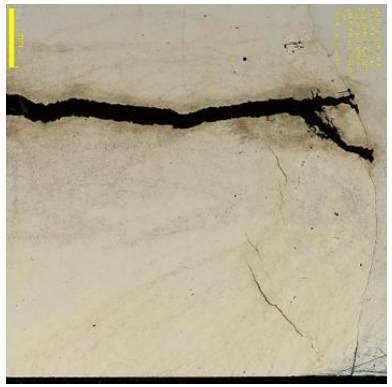
6 Zusammenfassung und Ausblick

Analyse verschiedener Lösungsansätze

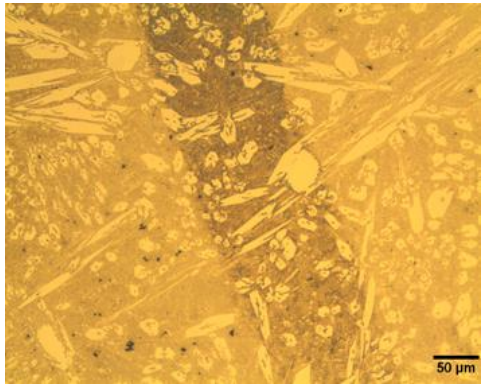
Werkstoffanalyse

- Beurteilung der Härte und des Gefüge des zu bearbeitenden Werkstoffes
- Abschätzung des Einflusses der Werkstoffeigenschaften auf das Zerspanverhalten

Beispiel: Gefügeanalyse auftraggeschweißte DUROXITE™-Schicht



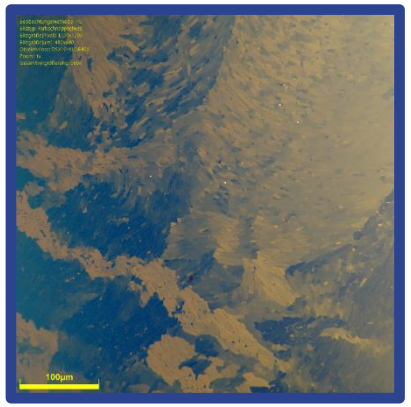
Riss in der aufgeschweißten Schicht



geätztes Schliffbild

- durch die Risse entsteht ein unterbrochener Schnitt
- Ausbildung langkörniger harter Chromkarbide
- Negative Auswirkungen auf die Zerspanung

Beispiel: Gefügeanalyse von TiAl6V4



- unterschiedliche Struktur, unterschiedliche Härte
- Schnellerer Werkzeugverschleiß bei inhomogenem Gefüge

Analyse verschiedener Lösungsansätze

Möglichkeiten der Prozessanalyse

Parameter

- Bearbeitungsaufgabe (z.B. Drehen, Fräsen, Bohren)
- Zerspanparameter (z.B. Vorschub, Drehzahl, Schnitttiefe, Zahnvorschub)
- Werkzeug- und Werkstück:
  - Spannsystem
  - Werkstoff
  - Geometrie

Beeinflussbare Größen:

- Kräfte X,Y,Z
- Momente M_z
- Temperaturen
- Schwingungen
- Verschleiß
- Spanform- und Spanfluss
- …

- Ermittlung relevanter Einflussfaktoren auf das Einsatzverhalten
- Die Auswahl der richtigen Parameter beeinflusst das Verschleißverhalten
- Systematische Analyse zur Ermittlung der besten Parameter führt zu höherer Werkzeugstandzeit
- Nachteil: Kenngrößenanalyse zeitaufwendig und teuer

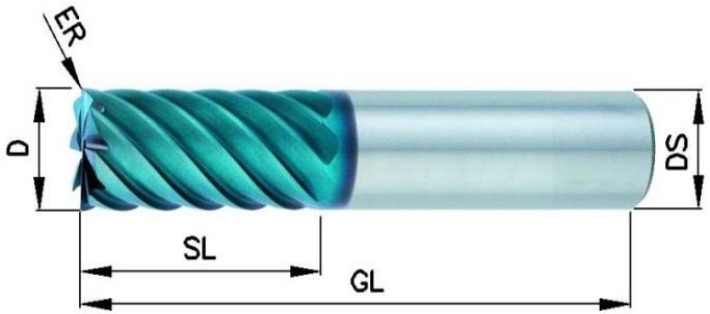
Analyse verschiedener Lösungsansätze

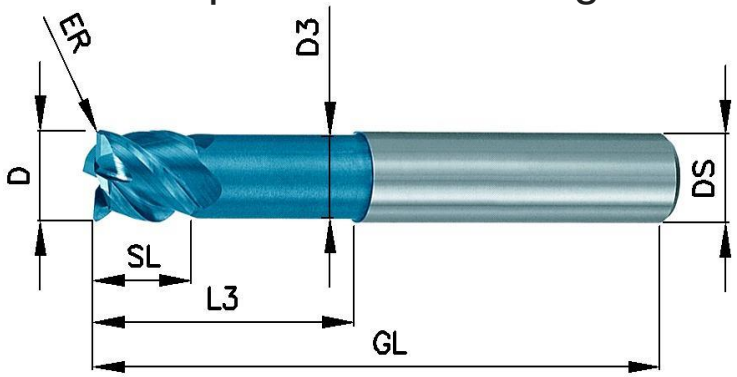
Erarbeitung angepasster Werkzeuggeometrien

Relevante Parameter aus der Sicht des Anwenders

- Schneidenanzahl → Wärmetransport, Verschleißverhalten
- Nutgestaltung → Spanformung, Spantransport
- Drallwinkel → Spanformung, Spankräfte, Oberflächenqualität
- Auslegung des Schneidkeils → Spanbildung, Standzeit, Oberflächenqualität
- Substratwerkstoff → Standzeit, Prozessstabilität

- Erarbeitung verschiedener Geometrien entsprechend der Aufgabenstellung

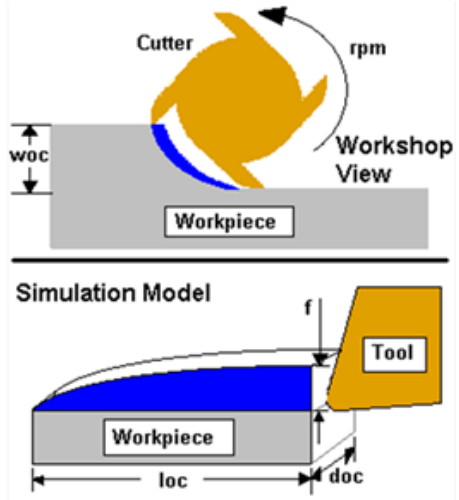




Analyse verschiedener Lösungsansätze

Simulation zur Ermittlung von Prozesskenngrößen

- Simulation Zerspanungsprozess mit Software AdvantEdge (Fa. Third Wave Systems)
- Ermittlung relevanter Kenngrößen (Kraft, Temperatur) und Vorhersage der Spanbildung
- Berechnung in Abhängigkeit von Werkzeuggeometrie und Zerspanbedingungen

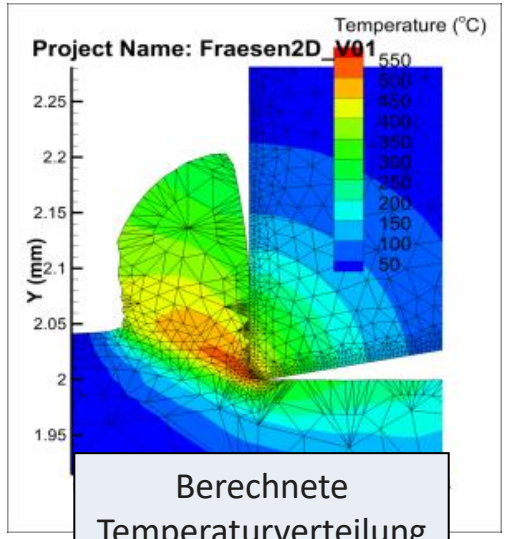


Modellgeometrie

Werkzeuggeometrie		
Werkzeugdurchmesser	10	mm
Anzahl Schneiden	6	
Spanwinkel	3	°
Freiwinkel	10	°
Kerndurchmesser	7	mm
Drallwinkel	45	°
axialer Freiwinkel	8	°
Schneidkantenradius	5 - 8	µm

Werkstoffe		
Werkstoff Werkzeug	Hartmetall (Feinstkorn)	
Werkzeugbeschichtung	AlTiN, 0,8 µm	
Werkstoff Werkstück	FeCrV12 /30 % VC	
Prozessparameter		
Drehzahl	3501	U/min
Vorschub pro Schneide	0,05	mm
Eingriff a_e	max. 0,5*D	mm
Tiefe a_p	0,5	mm

Parameter



Berechnete Temperaturverteilung

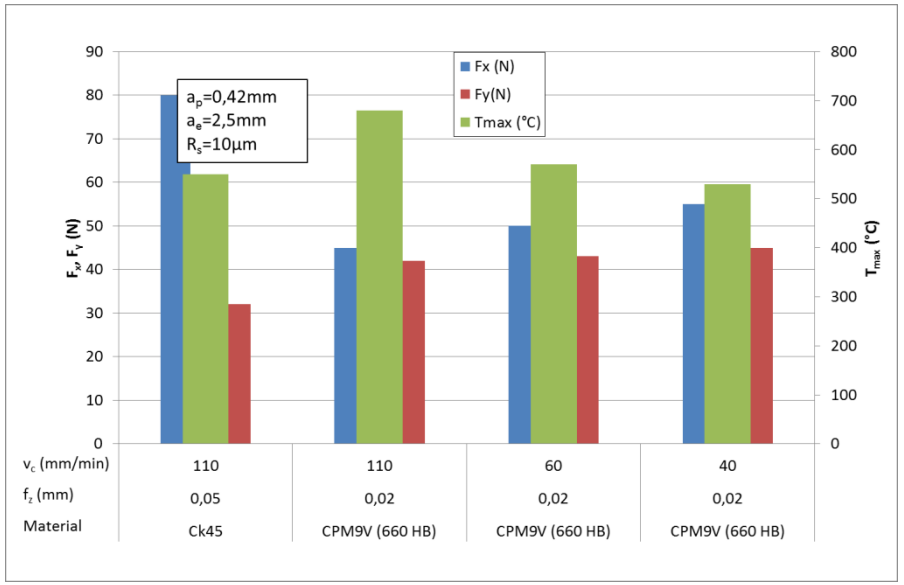
- Anpassung Werkzeuggeometrie
- Optimierung Prozessparameter

Analyse verschiedener Lösungsansätze

Simulation Fräsen auftraggeschweißter Schichten

Temperatur und Zerspankräfte bei Variation der Prozessparameter

- Mit höherer Prozessgeschwindigkeit steigen Temperaturen und sinken Härte und auftretende Kräfte
- Gute Übereinstimmung mit Kraftmessungen im Prozess

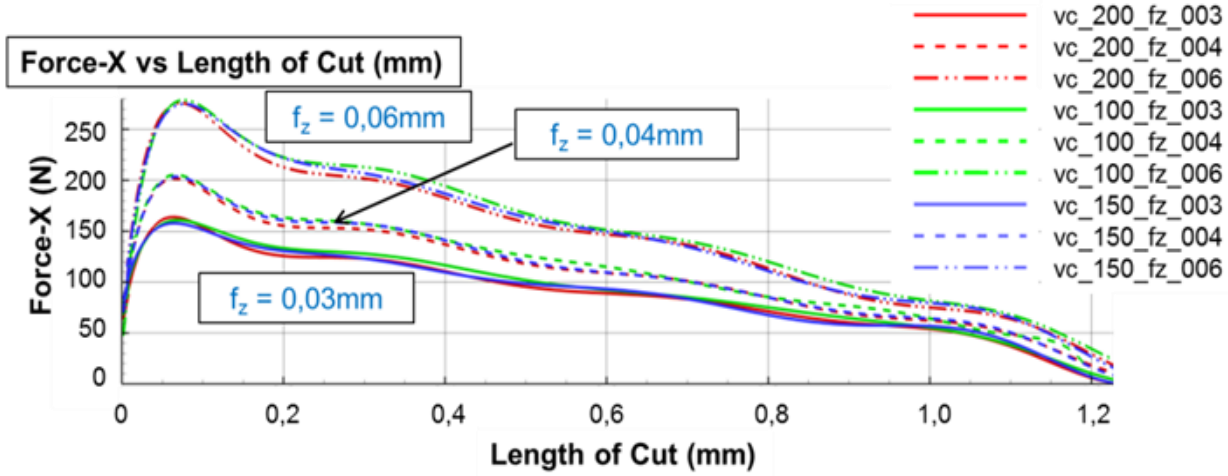


- reduzierte f_z und v_c
- Reduzierung von Kraft- und Temperaturunterschieden

Simulation Fräsen von Inconel

Variation der Zerspanparameter (v_c, f_z, a_p a_e)

Variation der Werkzeuggeometrie (Spanwinkel, Freiwinkel, Durchmesser, Kantenradius)



Kraftverlauf bei Variation von v_c und f_z

- Variation von f_z führt zu stärker Änderung in der Kraft
- v_c hat nur geringen Einfluss auf Kraftverlauf

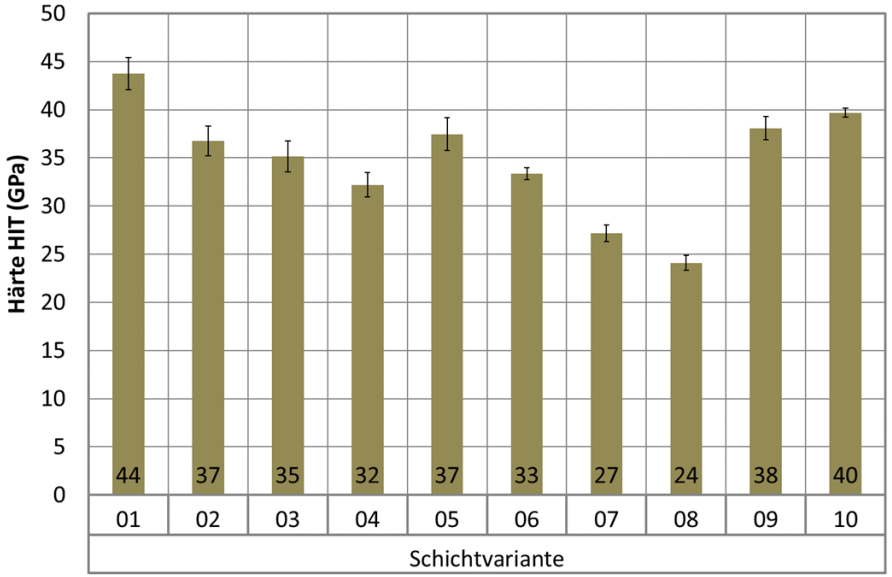
Analyse verschiedener Lösungsansätze

Einsatz aufgabenangepasster Hartstoffschichten

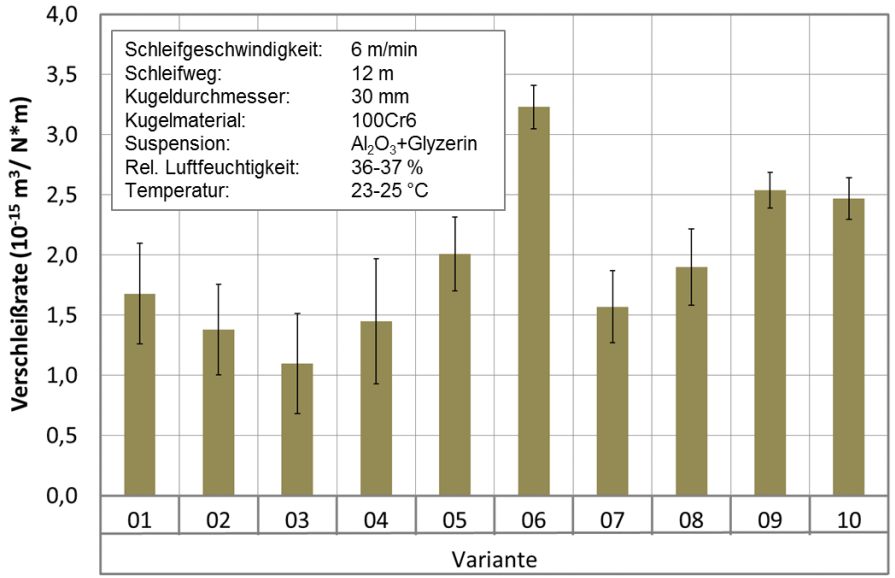
18438 BG

Einsatz von PVD-Schichten zur Verbesserung des Verschleißverhaltens

- Nutzung verschiedener Schichtstrukturen und Abscheidebedingungen
- Kombination von verschiedenen Legierungselementen (Si, O) und Strukturen (Multilayer, Nanolayer)
- Verbesserung thermische Beständigkeit und Verschleißbeständigkeit



01 nACo
02 nACo³
03 AlTiCrN³
04 AlTiN-ML
05 TiXCo³
06 AlCrN-OXI-2A
07 TiAlN-nc
08 TiAlN/TiSiN
09 TiXCo⁴-400
10 TiXCo⁴-1511



Schichthärte mittels Nanoindedation

Hohe Härte ist Indiz für Verschleißbeständigkeit

zu hohe Härte (> 45 GPa) ungünstig, da sprödes Schichtverhalten

Abrasionsverschleiß mittels Kalottenschliff

Niedrige Verschleißrate: hohe Verschleißbeständigkeit

Agenda

1 Vorstellung der GFE

2 Hartbearbeitung

3 Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

4 Analyse verschiedener Lösungsansätze

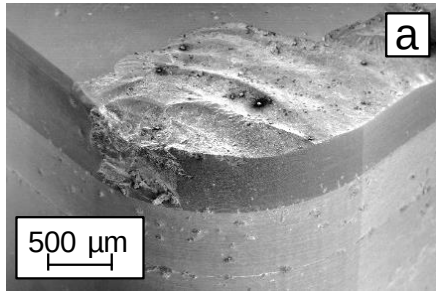
5 Einsatzbeispiele

6 Zusammenfassung und Ausblick

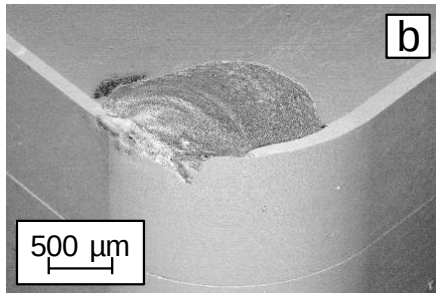
Drehen gehärter Werkstoffe mit PCBN-Schneidstoffen

18438 BG

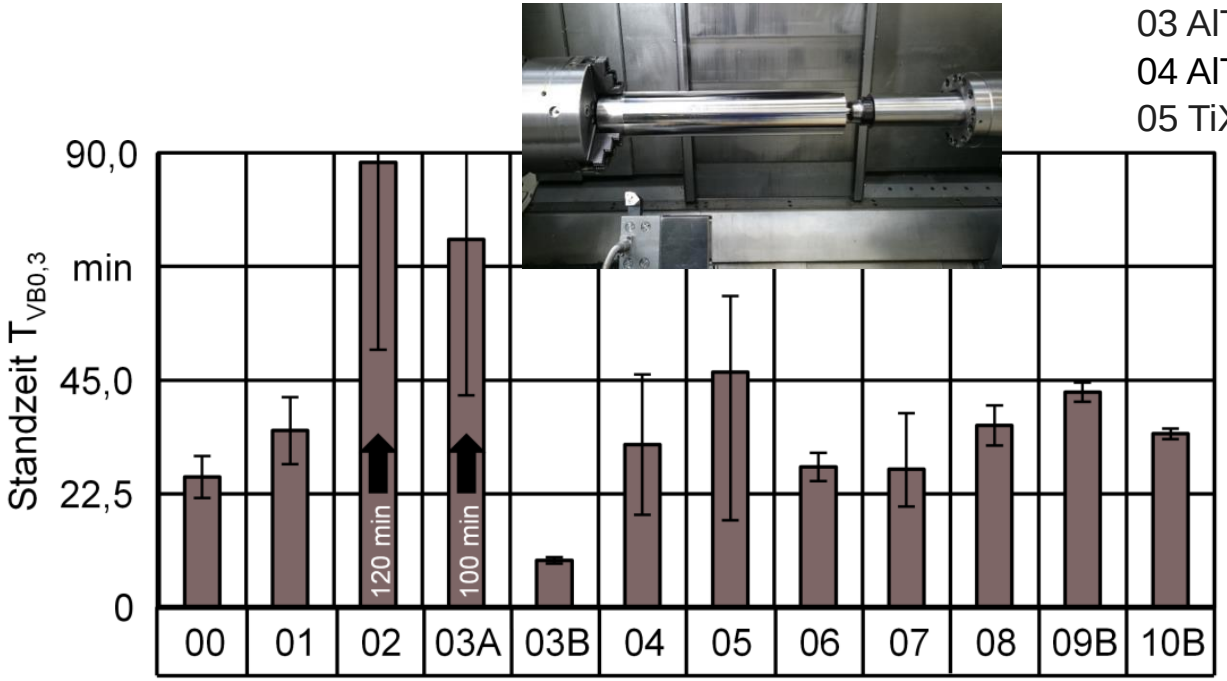
- Drehen von 100Cr6 (60 HRC)
- Konventionelle Parameter (v_c = 100 m/min, f = 0,08 mm, a_p = 0,25 mm)
- Schichten mit gutem Abrasionswiderstand und geringer Wärmeleitfähigkeit nötig
- 3-fache Standzeit mit Nanocomposites und nanolagigen Schichten erreicht



Unbeschichtet (704 T.)



AlTiNCrN³ (628 T.)



01 nACo
02 nACo³
03 AlTiCrN³
04 AlTiN-ML
05 TiXCo³
06 AlCrN-OXI-2A
07 TiAlN-nc
08 TiAlN/TiSiN
09 TiXCo⁴-400
10 TiXCo⁴-1511

Werkzeuge:
ISO Code: CNMA120408
Werkstück:
100Cr6+QT (1.3505),
HRC 60±2

Prozessparameter:
v_c = 100 m/min
f = 0,08 mm
a_p = 0,25 mm
Außenlängs-Runddrehen
Trockenbearbeitung

Einsatzbeispiele

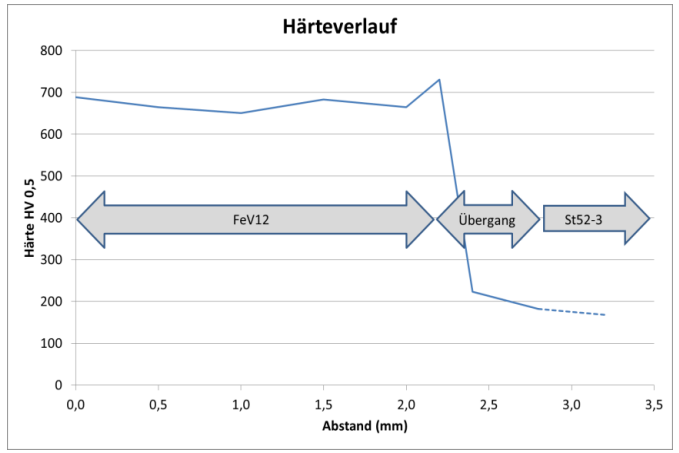
Fräsen auftraggeschweißter Oberflächen

KF2263513 / KF2306303

Versuchsbedingungen

- FeV12-beschichteter St37- Probekörper
- Definierter Härteverlauf
- Nutzung verschiedener Werkzeugsubstrate:
  - Hartmetall (Co-Anteil 8 bzw. 10 %, Feinstkorn HM)
- Variation der Werkzeuggeometrie
  - Unterschiedliche Längen, Zähnezahl, Frei- und Spanwinkel
- Optimierte Zerspanparameter (entsprechend Simulation)

	v_c (m/min)	f_z (mm)	a_e (mm)	a_p (mm)	Kühlung
Bisher	40	0,02	1,0	6,0	trocken
neu	251	0,0625	0,2	8,0	Kaltluftdüse

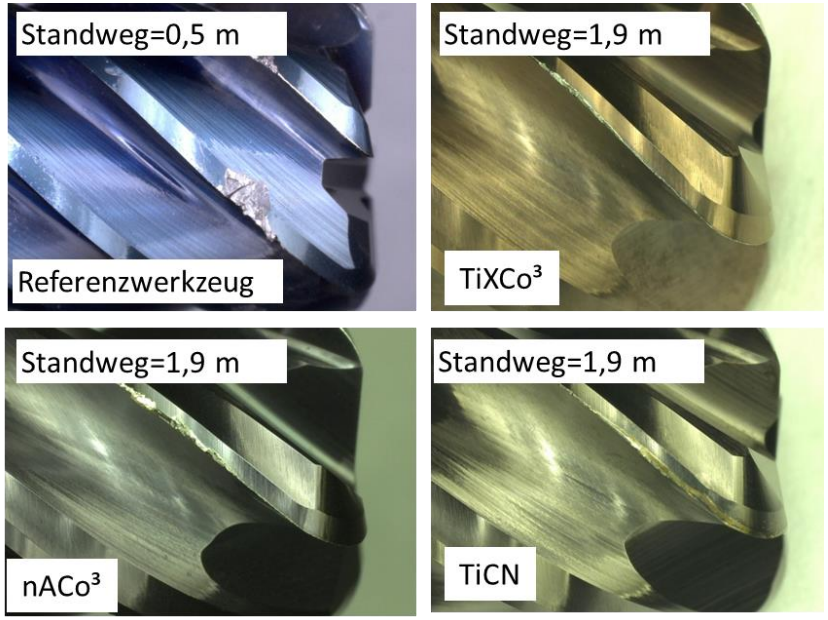


Fräsen auftraggeschweißter Oberflächen

KF2263513 / KF2306303

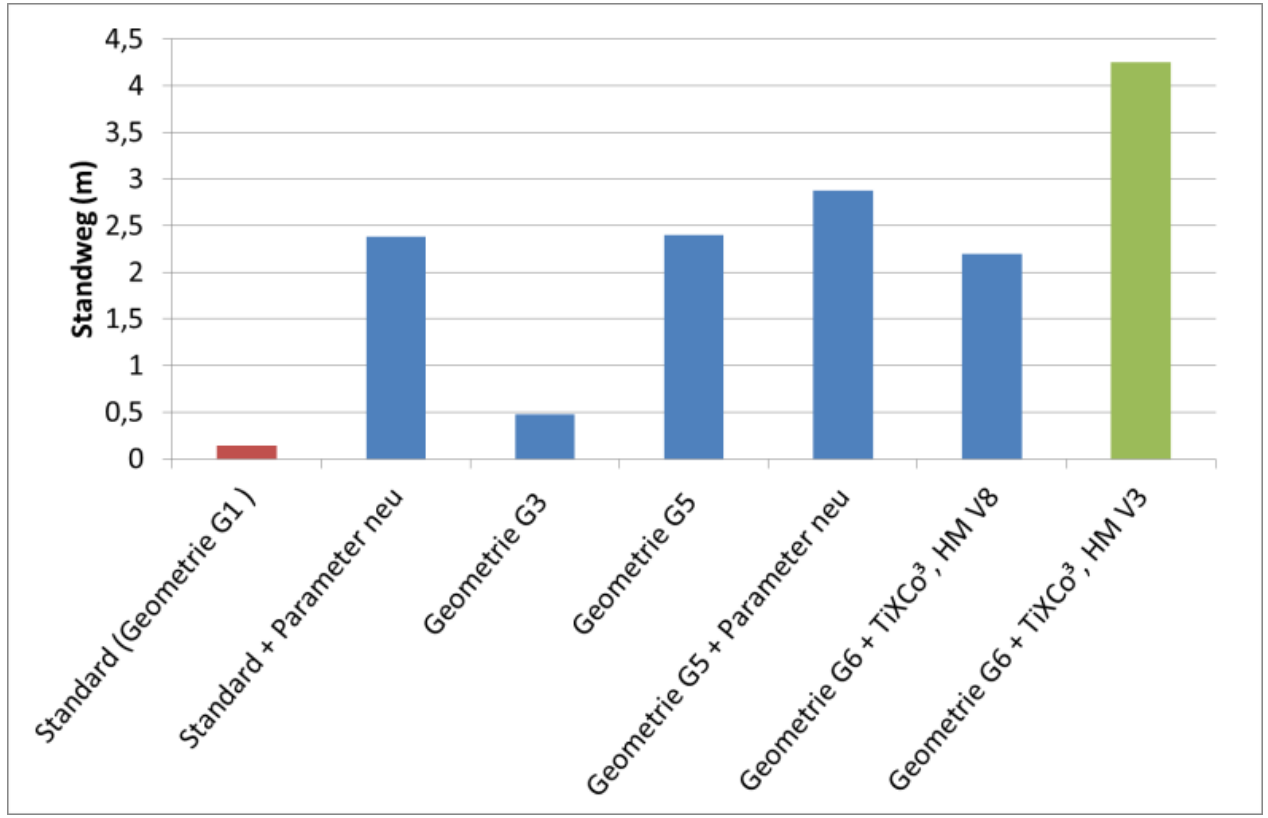
Verschleißverhalten

- Verbesserung des Verschleißverhaltens → höherer Standweg
- Stabile Schneide → höhere Prozesssicherheit



Standwegerhöhung

- Angepasste Werkzeuggeometrie und optimierte Werkzeugsubstrate
- Optimierte Prozessparameter
- Neue Hartstoffbeschichtung



Fräsen von gehärteten Stählen

Fräsen von gehärteten Stählen mit beschichteten Fräsern D = 12 mm; unterschiedliche HM-Sorten

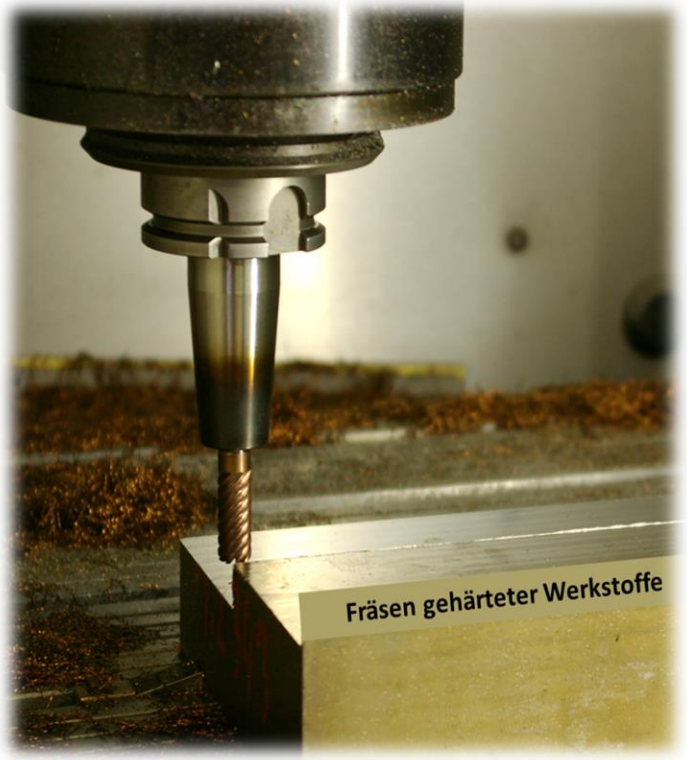
Versuchswerkstoff:
1.2379 (61 HRC)

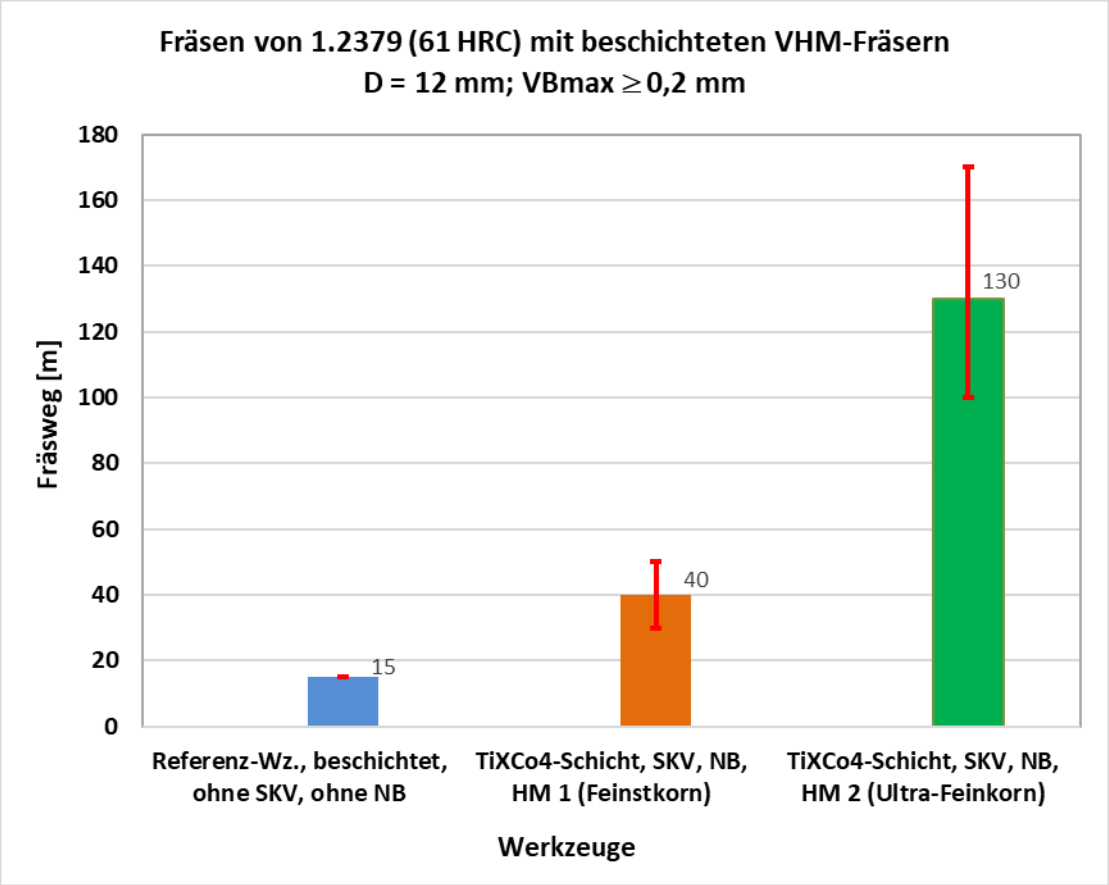
Werkzeug:
VHM-Schaftfräser, D = 12 mm;
Schicht: TiXCo[4]
HM1: Feinstkorn, HM2: Ultra-Feinkorn

Zerspanparameter:
v_c = 100 m • min^{-1}
f_z = 0,05 mm
a_p = 15 m
a_e = 0,12 mm

Trockenbearbeitung

Verschleißkriterium:
VB_{max} = 0,20 mm





SKV … Schneidkantenverrundung
NB … Schichtnachbehandlung

Fräsen von gehärteten Stählen

Herausforderung : Spanende Bearbeitung von Maschinenmessern
Bearbeitung von gehärteten Schnellarbeitsstählen S6-5-2 (1.3343)

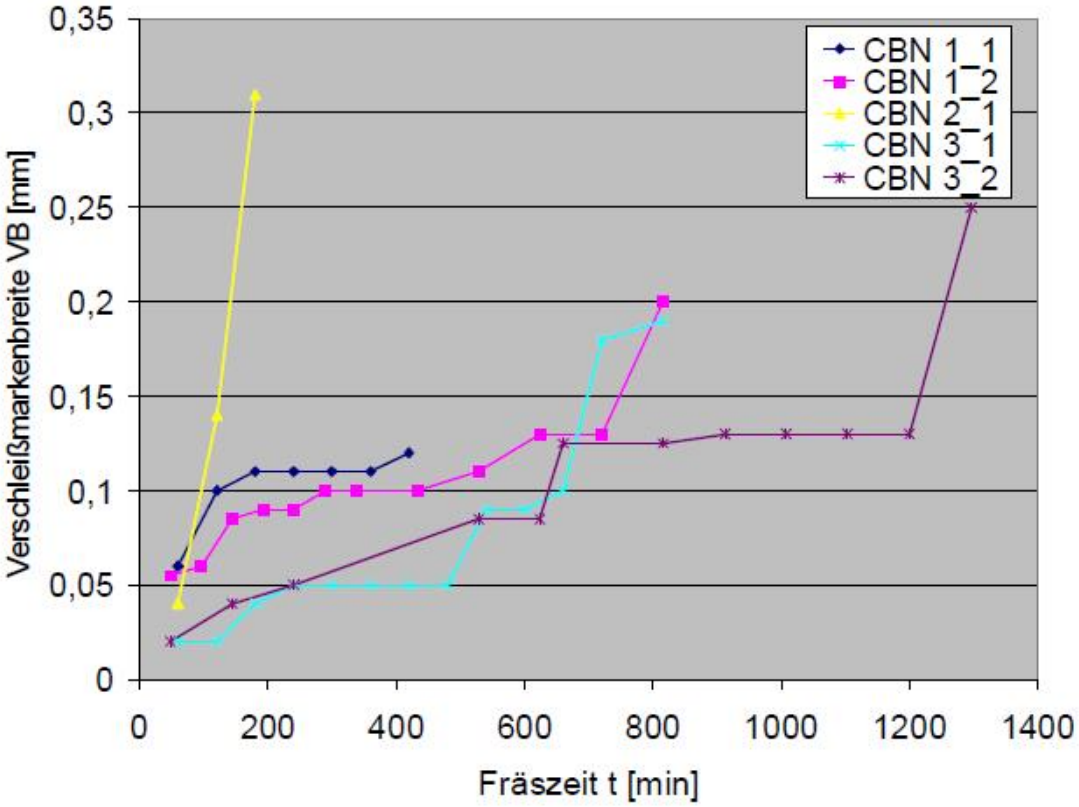
Parameter:

v_c = 100 m/min

v_f = 5,2 mm/min

a_p = 0,5 mm

a_e = 4 mm

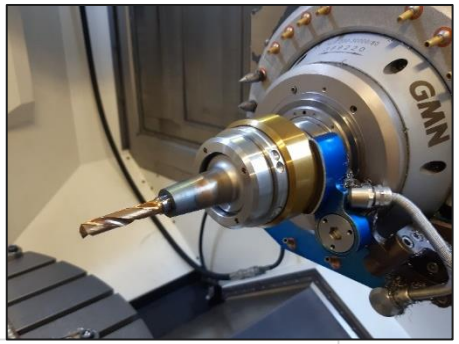


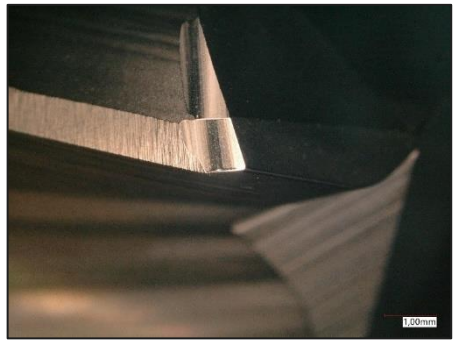
Bohren von DUROXITE™

16KN086920 / 16KN086921

Herausforderung bei der Bearbeitung von DUROXITE™: inhomogenes Gefüge, sehr harte Karbide

Makrogeometrie	Variante mit Eckenradius R1
Hartmetall	GU10UF
Schneidkantenverrundung	50-60 µm
Beschichtung	PSiX (+ Nachbehandlung)



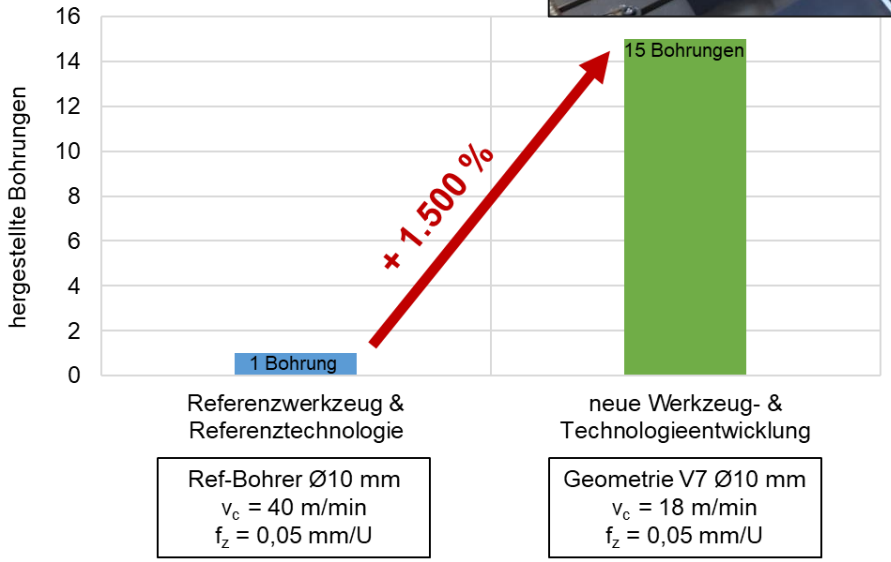


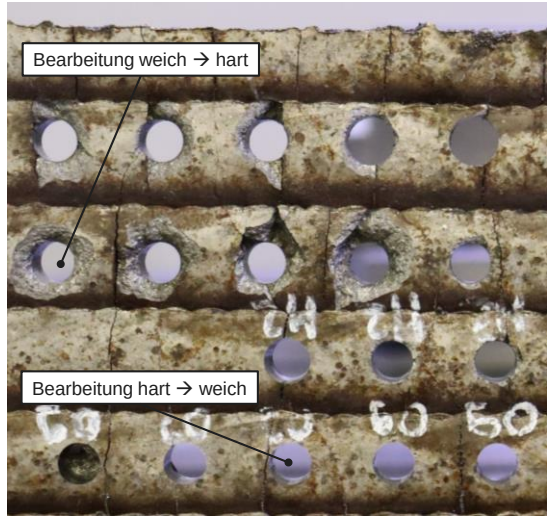
Bearbeitungstechnologie
hart → weich

Schnittgeschwindigkeit
v_c = 18 m/min

Vorschub
f_z = 0,05 mm/U

Kühlung
periphere Kühlung (über Spannhülse)





Agenda

1 Vorstellung der GFE

2 Hartbearbeitung

3 Strategien zur effizienten Hartbearbeitung

4 Analyse verschiedener Lösungsansätze

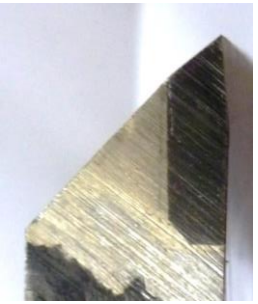
5 Einsatzbeispiele

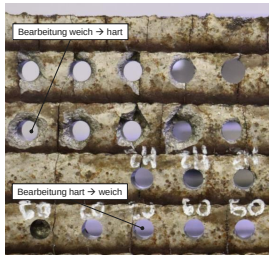
6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Verbesserte Bearbeitung von schwer spanbaren Werkstoffen durch

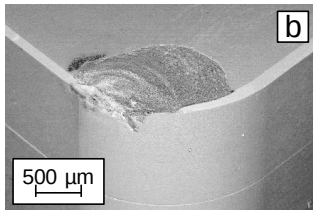
- Verbesserte Werkzeuggeometrien und Substratwerkstoffe
- Angepasste Prozessparameter und Bearbeitungsstrategien
- Simulation zur Optimierung von Werkzeuggeometrie und Zerspanparametern

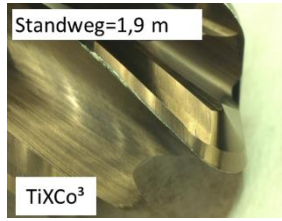


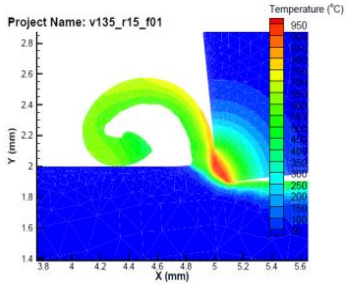


Erzielte Ergebnisse

- Signifikante Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit
- Erhöhung der Werkzeugstandzeit
- Nachweis der Einsetzbarkeit bei verschiedenen Anwendungen







Ersatz des Schleifens durch die Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide ist möglich

Weitere Entwicklungsschwerpunkte / Aufgabenstellungen zur Verbesserung des Einsatzverhaltens

- Prozessangepasste Makro- und Mikrogeometrie (Kleinstwerkzeuge, Schneidkantenpräpartion, Schichtpolitur)
- Bearbeitungstechnologie (Maschinenauswahl, Prozessparameter, Kühlung)
- Verbesserung der Schichteigenschaften (Abrasionsbeständigkeit, Temperaturbeständigkeit, Haftung, …)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. Heiko Frank

Bereichsleiter Beschichtung

h.frank@gfe-net.de

+49 3683 6900 772

Dr. Florian Welzel

Geschäftsführer

f.welzel@gfe-net.de

+49 3683 6900 20

www.gfe-net.de